

Questions éthiques et problèmes scientifiques posés par la nanotechnologie sur les lieux de travail

Paul A. Schulte¹ et Fabio Salamanca-Buentello²

¹National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, Cincinnati, Ohio, USA ; ²University of Toronto Joint Centre for Bioethics et Canadian Program on Genomics and Global Health, Toronto, Ontario, Canada

En l'absence de clarté scientifique sur les effets possibles sur la santé de l'exposition aux nanoparticules dans le cadre du travail, il existe un besoin de directives concernant les prises de décisions applicables aux dangers, aux risques et aux contrôles. L'identification des questions éthiques en jeu pourra être utile aux décideurs, et en particulier aux employeurs, travailleurs, investisseurs et autorités sanitaires. Étant donné que l'objectif de la sécurité et de la santé sur les lieux de travail est la prévention des maladies chez les travailleurs, les circonstances qui affectent le plus ces derniers et qui mettent en jeu des questions éthiques ont été identifiées. Ces circonstances comprennent *a*) l'identification et la communication des dangers et des risques par les chercheurs scientifiques, les autorités compétentes et les employeurs ; *b*) l'acceptation des risques par les travailleurs ; *c*) le choix et la mise en œuvre des contrôles ; *d*) l'établissement de programmes médicaux de dépistage ; et *e*) l'investissement dans la recherche portant sur la toxicologie et les contrôles. Les questions éthiques impliquent la détermination impartiale des dangers et des risques, la non-malfaisance (le fait de ne causer aucun mal), l'autonomie, la justice, le respect de la vie privée et la promotion du respect des personnes. Au fur et à mesure que l'on identifie les questions éthiques et qu'on les explore, des options peuvent être mises au point à l'attention des décideurs. En outre, les délibérations sociétales relatives aux risques des nanotechnologies sur les lieux de travail peuvent être affinées en mettant l'accent spécialement sur les petites entreprises et par l'adoption d'une perspective mondiale. **Mots clés** : risques, nanotechnologie, sécurité et santé au travail, particules, toxicologie. Please cite to the original English version of this article— *Environ Health Perspect* 118:000–000 (2010). doi:10.1289/ehp.9456 disponible en <http://dx.doi.org/> [En ligne le 25 septembre 2006]

Cadre d'étude des questions éthiques

Le cadre d'étude des questions éthiques peut être tiré des œuvres de Gert et al. (1997), Gewirth (1978, 1986), et Schrader-Frechette (1994) ainsi que de la méthode d'approche de Beauchamp et Childress (1994) reposant sur « l'analyse des principes ». Les questions éthiques qui affectent le plus les travailleurs, dont les emplois mettent en cause des nanomatériaux, sont liées à l'identification et à la communication des dangers et des risques par les chercheurs scientifiques, les autorités et les employeurs ; à l'acceptation des risques par les travailleurs ; à la mise en œuvre de contrôles ; au choix de la participation à un dépistage clinique ; et aux investissements adéquats dans les études toxicologiques et le contrôle de l'exposition (Tableau 1). Les questions éthiques impliquent l'identification et la détermination des dangers et des risques, la non-malfaisance (le fait de ne causer aucun mal), de l'autonomie (l'auto-détermination), la justice (la répartition équitable des risques), le respect de la vie privée (lors du traitement des informations médicales) et le respect des personnes.

La connaissance scientifique des faits – qui est la base des décisions déontologiques concernant la sécurité et la santé dans les milieux professionnels – peut être influencée par des préjugés et des valeurs (Kantrowitz 1995). La

Adresser toute correspondance à P.A. Schulte, NIOSH, 4676 Columbia Parkway, Cincinnati, OH 45226 USA. Téléphone : +(1) (513) 533-8302. Télécopie : +(1) (513) 533-8588. Courriel : pschulte@cdc.gov

Nous remercions les personnes suivantes pour leur apport ou leurs commentaires sur des projets antérieurs : M. Ellenbecker, S. Samuels, H. Kipen, M. Hoover, E. Kuempel, R. Zumwalde, C. Geraci, V. Murashov, P. Middendorf.

Les résultats et les conclusions exprimés dans cet article appartiennent à leurs auteurs et ne représentent pas nécessairement l'opinion de l'organisme national américain responsable des questions de sécurité, de santé et d'hygiène professionnelle (National Institute for Occupational Safety and Health).

Les auteurs déclarent qu'ils ne détiennent aucun intérêt financier influençant leurs opinions.

Reçu le 23 juin 2006 ; accepté le 25 septembre 2006.

This translation is provided by TransPerfect Translations, USA. EHP strives to ensure that its foreign-language materials are faithful translations of their original English-language counterparts. Please report any problems or discrepancies to hu1@niehs.nih.gov.

Les sciences et technologies ont identifié des propriétés uniques aux matériaux dont les dimensions se situent dans une plage de 1 à 100 nm [Health and Safety Executive (HSE) 2004; National Nanotechnology Initiative (NNI) 2004]. Ces propriétés peuvent générer de nombreux avantages sociaux à grande portée, mais elles peuvent aussi constituer des dangers et poser des risques. L'un des sujets de préoccupation concernant ces dangers est le lieu de travail (qu'il s'agisse d'un laboratoire de recherche, d'une jeune entreprise innovante, d'une installation de production ou d'une exploitation dans laquelle des nanomatériaux manufacturés sont traités, utilisés, éliminés ou recyclés). Ces lieux de travail sont ceux où surviennent les premières expositions sociétales aux nanoparticules de synthèse. Il est probable que ces expositions ont lieu par inadvertance ou par accident. Malgré une prise de conscience par les autorités administratives, les sociétés, les organismes non gouvernementaux (ONG), les syndicats, les enseignants et les travailleurs afin de prévoir et de faire face aux dangers possibles sur les lieux de travail [Bartis et Landree 2006 ; Hett 2004 ; National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) 2006 ; National Science and Technology Council (NSTC) 2006 ; Roco et Bainbridge 2003 ; Scientific Committee on Engineering and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) 2005], il est toujours probable que les travailleurs soient exposés aux nanomatériaux.

Une grande partie de la recherche sur les aspects éthiques de la nanotechnologie s'est centrée sur les questions d'ordre général, telles que l'équité, la vie privée, la sécurité, l'impact environnemental et les applications métaphysiques concernant les interactions homme-machine (Mnyusiwalla et al. 2003 ; Moor et Weckert 2004 ; Singer 2004). Aucune recherche spécifique sur l'éthique concernant les lieux de travail n'a encore été mise en œuvre. Afin d'aider à prévoir l'impact de la nanotechnologie, il est important de présenter un cadre pour les questions scientifiques et d'éthique mises en jeu par la nanotechnologie sur les lieux de travail. Une analyse de l'éthique peut donner à la société des assurances comme quoi les vastes promesses de la nanotechnologie ne cachent ni dangers ni risques pour les travailleurs. Une opinion émergeante émergeante prone à dire que la nanoscience et la nanotechnologie ne pourraient pas être basées sur les pratiques du passé pour lesquelles la réflexion éthique et sociale est une étape secondaire suivant l'utilisation de la science nouvellement développée ; au contraire, les réflexions sur l'éthique doivent accompagner la recherche à chacun de ses pas (National Academy of Engineering 2004). L'objectif que nous visons dans cet article est l'identification des questions éthiques directement liées à la nanotechnologie sur les lieux de travail et leurs conséquences sur la santé et la sécurité des travailleurs.

connaissance scientifique est inévitablement chargée de valeurs. Aucune théorie scientifique ne peut être considérée comme totalement objective, mais une théorie particulière peut être plus objective qu'une autre (Shrader-Frechette 1994). La manière selon laquelle la nanotechnologie est décrite, avec ses avantages possibles, ses dangers et ses risques associés, est sous-jacente aux décisions déontologiques. Lorsque les informations relatives aux dangers des nanoparticules sont mises en doute, la question critique qui se pose revient à savoir où tracer la ligne séparant le niveau de protection nécessaire et le risque résiduel pour un certain niveau de protection donné.

L'évaluation des risques est partiellement subjective et comporte une probabilité élevée d'influence politique. Toutes les estimations de risques sont donc chargées de valeur. Aucun scénario employé pour la description des risques et des contrôles ne peut suffire du fait de la nature hétérogène de la nanotechnologie et du fait qu'elle est en cours de développement. Les questions éthiques seront spécifiques seulement en ce qui concerne la base des connaissances à un moment donné et pour un scénario de production et d'utilisation spécifique. Les chercheurs ont suggéré que même avec ce type de spécificité, d'autres évaluations sont nécessaires pour capter les valeurs déontologiques et politiques qui éclairent les politiques telles que celles qui mettent en jeu la nanotechnologie (Shrader-Frechette 2002).

État actuel des connaissances relatives aux dangers et aux risques de la nanotechnologie

La manière selon laquelle la nanotechnologie est décrite peut influencer les réactions de la société envers la recherche et le développement, et envers la prévention et le contrôle des dangers possibles des nanomatériaux sur les lieux de travail (Berube 2004). Le terme « nanotechnologie » est trompeur, car il ne s'agit pas d'une technologie unique mais, au contraire, d'un ensemble multidisciplinaire de

procédés physiques, chimiques, biologiques, électroniques et d'ingénierie, de matériaux, d'applications et de concepts où la dimension constitue la caractéristique dominante (Aitken et al. 2004). Cependant, les questions de dimension, de caractéristiques des surfaces, de durabilité, de composition chimique et d'autres propriétés physico-chimiques ne sont pas bien déterminées dans cette définition. Une définition plus élargie et précise comprend également les structures avec des propriétés nouvelles pouvant être manipulées à l'échelle atomique (NNI 2004 ; Salamanca-Buentello et al. 2005). On peut considérer que les nanoparticules appartiennent au moins à deux catégories : les nanoparticules synthétisées et les nanoparticules incidentes (ou adventives). Les nanoparticules synthétisées sont conçues avec des propriétés très spécifiques. Les nanoparticules incidentes (naturelles et anthropogènes) sont générées d'une manière relativement non contrôlée et sont généralement physiquement et chimiquement hétérogènes par comparaison avec les nanoparticules synthétisées (NIOSH 2006). Bien que les quatre méthodes actuelles de grande production de nanoparticules synthétisées (par synthèse en phase gazeuse, par dépôt de vapeurs, par méthodes colloïdales et par attrition (ou alors juste « par » pour la 1^{ère} méthode mais pas les suivantes)) puissent exposer les travailleurs par inhalation, par absorption dermique et par ingestion, la quantité et la probabilité d'exposition des travailleurs n'a pas été bien établie. La question critique (basée sur le peu d'informations disponibles) se rapporte à l'évaluation des dangers et des risques. Le thème unificateur est le suivant : les nanoparticules sont plus petites que leurs contreparties en vrac, mais elles ont une plus grande superficie et un plus grand nombre de particules par unité de masse ; ces caractéristiques augmentent généralement les possibilités de toxicité par suite d'une augmentation possible de la réactivité (Aitken et al. 2004). L'application de cette théorie à l'ensemble de la nanotechnologie plutôt qu'aux particules

et aux procédés spécifiques peut augmenter au lieu de diminuer l'incertitude relative aux dangers et aux risques. D'autres caractéristiques, en plus de celles de la dimension des particules (ex. : des caractéristiques de superficie), qui influencent la toxicité, sont de plus en plus souvent identifiées (Donaldson et al. 2006; Warheit et al. 2004). Ces caractéristiques sont extrêmement variables. Par conséquent, il est utile de poser des limites à l'incertitude en ajoutant de la précision au langage utilisé pour décrire les dangers et les risques des nanoparticules. Compte tenu de l'existence de divers mélanges de particules et de procédés, il est vraisemblable que les dangers et les risques seront évalués avec une plus grande exactitude au cas par cas – ou au moins selon le type de méthode de synthèse et selon que les particules sont incorporées dans une matrice ou à l'état libre.

Connaissance des dangers et des risques.

Les données concernant les effets mis en cause par la nanotechnologie sur la santé chez les travailleurs sont limitées à cause de la nouveauté de ce domaine, du nombre relativement faible de travailleurs potentiellement exposés à ce jour, et du manque de temps écoulé pour permettre aux maladies chroniques de se développer et d'être détectées. L'expérience humaine la plus significative a trait à l'exposition à des particules ultrafines (comprenant des particules dont le diamètre est < 100 nm) et à de fines particules (dont le diamètre est < 2,5 µm). Les particules fines et ultrafines ont été évaluées dans des études épidémiologiques sur la pollution de l'air et dans des études sur des cohortes professionnelles exposées à des poussières minérales, des fibres, des fumées de soudage, des produits de combustion, et à des particules médiocrement solubles, de faible toxicité, telles que le dioxyde de titane et le noir de carbone (Maynard and Kuempel 2005; Nel et al. 2006). Les dangers de ces expositions et des expositions aux nanoparticules synthétisées sont également identifiés dans des études sur les animaux (Donaldson et al. 2004, 2006 ; Elder et al.

Tableau 1. Questions éthiques mettant en cause des nanomatériaux sur les lieux de travail.

Scénarios liés au travail	Principes éthiques en jeu	Questions relatives aux prises de décision
Identification et communication des dangers et des risques	Responsabilité des chercheurs scientifiques Non-malfaisance Autonomie Respect des personnes	Mesure dans laquelle les points forts et les faiblesses des données sont identifiés Degré de participation aux discussions publiques Exactitude des communications Opportunité dans le temps des communications
Acceptation des risques par les travailleurs	Autonomie Respect des personnes Justice	Degré d'inclusion des travailleurs dans les prises de décision
Sélection et mise en œuvre des contrôles sur les lieux de travail	Non-malfaisance Bienfaisance Respect des personnes	Niveau des techniques de contrôle utilisées
Dépistage clinique chez les travailleurs affectés par la nanotechnologie	Autonomie Respect de la vie privée Respect des personnes	Adéquation des raisons fournies pour le dépistage clinique Mesure dans laquelle la participation est volontaire Maintien de la confidentialité des résultats d'analyse et de tests
Investissement dans la recherche sur la toxicologie et le contrôle	Non-malfaisance Justice Respect des personnes	Caractère adéquat des investissements

2006 ; Lam et al. 2004, 2006 ; Oberdörster et al. 2005 ; Shvedova et al. 2005 ; Warheit et al. 2004). Il existe une forte relation entre la superficie, la contrainte due à l'oxydation et les effets pro-inflammatoires des nanoparticules dans les poumons. Plus la contrainte due à l'oxydation est forte et plus la probabilité du risque d'inflammation et de cytotoxicité est élevée (Nel et al. 2004, 2006 ; Oberdörster et al. 2005). Les résultats des études sur les animaux doivent, en fin de compte, être interprétés en termes d'exposition (dose) que les humains pourraient tolérer. Bien que la question soit encore débattue, les études sur la pollution de l'air ont mis en évidence une association entre l'augmentation de la pollution de l'air par les particules de matière (la fraction la plus fine des particules de matière, PM_{2.5}, avec un diamètre aérodynamique < 2,5 µm) et les effets indésirables sur la santé chez les membres vulnérables de la population – en particulier, chez les personnes âgées atteintes de maladies respiratoires ou cardiovasculaires [Mark 2004 ; Peters 2005 ; U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) 2004]. En outre, les concentrations associées aux effets mesurables dans la population sont vraiment faibles (Aitken et al. 2004).

Dans des études effectuées dans des milieux professionnels, les populations qui sont exposées de façon répétée aux dangers des poussières minérales et des fibres situées dans la plage des poussières respirables (ex. : quartz et amiante, respectivement) ont des effets bien connus sur la santé dépendants de la dose inhalée (Maynard and Kuempel 2005). Avec l'amiante, les facteurs de risque critiques pour le développement des maladies respiratoires sont la longueur, le diamètre et la persistance biologique des fibres. En ce qui concerne les poussières faiblement toxiques, mais médiocrement solubles, les petites particules de dimensions situées dans la plage des nanomètres paraissent causer une augmentation du risque de cancer du poumon chez les animaux, qui est fonction de la dimension des particules et de leur superficie (Heinrich et al. 2004, 2006 ; Oberdörster et al. 2005 ; Tran et al. 2000).

Bien que les résultats ne soient pas concluants, diverses études chez les animaux sur les nanoparticules synthétisées ont traité à l'existence et à la gravité des dangers posés pour les travailleurs exposés (Kipen et Laskin 2005). Les effets indésirables possibles comprennent le développement d'une fibrose et d'autres effets pulmonaires après une exposition à court terme aux nanotubes de carbone (Lam et al. 2004, 2006 ; Oberdörster et al. 2005 ; Shvedova et al. 2005), la translocation des nanoparticules dans le cerveau via le nerf olfactif, la capacité des nanoparticules à se transporter dans la circulation et la possibilité que les nanoparticules activent les plaquettes

sanguines et augmentent les thromboses vasculaires (Radomski et al. 2005).

Aucun de ces résultats n'est concluant relativement à la nature et à l'étendue des dangers, mais ensemble, ils peuvent suffire à soutenir les actions de prévention.

En fin de compte, la signification de l'information sur les dangers dépend de la mesure dans laquelle les travailleurs sont exposés au danger. Cela est le critère de définition du risque (la probabilité qu'un travailleur exposé tombe malade). Un besoin d'évaluation des risques spécifiques aux nanoparticules a été identifié (c.-à-d., ceux qui utilisent les doses normales les mieux appropriées au lieu de la masse normale), il sera unique à la nanotechnologie (National Academy of Engineering 2004 ; SCENIHR 2005).

L'évaluation des risques a été largement utilisée pour gérer l'incertitude des risques que les procédés ou les produits chimiques nouvellement introduits présentent pour les humains. Cependant, la nanotechnologie englobe une gamme variée de compositions, de structures et d'applications, et il se peut qu'une simple stratégie d'évaluation et de gestion des risques ne soit pas appropriée (Wardak and Rejeski 2003). La nanotechnologie met en cause la manipulation de matière à une nanoéchelle pour produire des matériaux, des structures et des dispositifs contenant des particules de types, de dimensions, de caractéristiques de superficie et de revêtements divers. Le meilleur moyen d'évaluer ces particules consiste probablement à effectuer toute une gamme d'évaluations des risques spécifiques au type de particule (composition, caractéristiques de superficie et forme) en question. Étant donnée la relation inversement proportionnelle entre la dimension de la particule et sa superficie, les relations entre la dose et les effets peuvent varier en fonction de la superficie totale et du nombre de particules, plutôt qu'en fonction des unités de masse (SCENIHR 2005). Les évaluations de risque seront utiles dans la mesure où elles refléteront les effets des dimensions et de la superficie des particules, mais elles devront également refléter d'autres caractéristiques des particules. En outre, on ne connaît pas aujourd'hui clairement la mesure dans laquelle les propriétés toxico-cinétiques (composantes importantes de l'évaluation des risques) peuvent être prévues à partir des propriétés physico-chimiques des nanoparticules (SCENIHR 2005).

Contrôles des dangers reposant sur des données probantes. Le modèle d'environnement professionnel le plus fréquemment utilisé identifie les sources de danger et les voies d'exposition (ex : l'inhalation, l'épiderme) [Office of Technology Assessment (OTA) 1985]. Un contrôle peut être établi à chacun de ces points. Les professionnels des questions de sécurité et de santé au travail ont

identifié une hiérarchie de contrôles fondée sur la fiabilité et l'efficacité, ainsi que sur le principe selon lequel l'environnement devrait être contrôlé avant que les travailleurs ne soient tenus d'adopter des mesures préventives (OTA 1985). Sous sa forme la plus simple, la hiérarchie des contrôles spécifie que les contrôles de fabrication (notamment, la substitution, le confinement, l'isolement et l'aération) sont préférables à l'emploi d'équipements de protection individuels (tels que les vêtements de protection et les respirateurs). Les pratiques professionnelles sont fréquemment incluses dans les tentatives de gestion des risques afin de minimiser l'exposition des travailleurs, et elles viennent souvent compléter l'usage des contrôles de fabrication. Les contrôles administratifs, tels que la permutation des travailleurs, sont parfois inclus et constituent généralement la « troisième ligne de défense » lorsque les contrôles de fabrication et les contrôles des pratiques professionnelles ne parviennent pas à atteindre le niveau de protection souhaité pour les travailleurs (OTA 1985).

En l'absence d'informations adéquates sur la toxicité et d'un historique approfondi sur les nanomatériaux utilisés, la raison justifiant des guides de contrôle repose sur l'expérience du contrôle de l'exposition aux particules ultrafines et aux gaz incidents. On considère que les nanoparticules atmosphériques n'ont pas d'inertie – et donc qu'elles se comportent de manière semblable aux gaz et se diffusent, si elles ne sont pas totalement confinées (Aitken et al. 2004). La riche histoire de la science des aérosols décrit les propriétés fondamentales des aérosols et leur contrôle [American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) 2001 ; Brown 1993 ; Burton 1997 ; Davies 1966 ; Friedlander 1977 ; Fuchs 1964 ; Hinds 1999 ; Rafterman 1996]. Bien que certaines autorités considèrent que les particules ultrafines sont équivalentes à des nanoparticules (SCENIHR 2005), elles sont normalement (mais non pas exclusivement) à l'extrémité supérieure de la plage de la nanoéchelle. Si les nanoparticules de l'air se conforment aux lois traditionnelles de la physique et de l'aérodynamique observées en ce qui concerne les plus grandes particules, les contrôles efficaces de capture des particules fines et ultrafines et des gaz (tels que le confinement à la source, un ventilateur extracteur local et des équipements de protection individuels) devraient alors être efficaces avec la génération actuelle de nanomatériaux. Il est raisonnable de penser que la plupart des méthodes de contrôle utilisées pour les particules fines et ultrafines, ainsi que pour les gaz, seront utiles pour le contrôle des nanoparticules, mais il n'existe aucune raison d'espérer que l'application de ces méthodes aux nouveaux procédés de génération de nanoparticules aboutira à un meilleur contrôle que

ce qui avait été démontré auparavant pour les poudres et les gaz à nanoéchelle (Aitken 2004). De nombreuses opinions indiquent que les effets indésirables des nanoparticules ne peuvent pas être prévus (ni dérivés) de la toxicité connue des matériaux en vrac ayant une composition chimique et des propriétés surfaciques semblables (SCENIHR 2005). La plage des options de contrôle des nanoparticules s'étend depuis l'absence de contrôle jusqu'à l'utilisation de l'isolement et du confinement mis en pratique pour les rayonnements, les gaz et les agents biologiques. La question est de savoir où choisir les contrôles dans ce continuum. Cela peut aussi déboucher sur la question financière de savoir quelle somme d'argent il faut investir dans ces contrôles. Lorsque les risques sont connus comme étant élevés ou faibles, la décision est relativement facile et les stratégies de

contrôle adéquates sont généralement apparentes. Cependant, lorsque les dangers sont incertains (comme avec les nanoparticules), la difficulté consiste à décider quel doit être le niveau approprié des contrôles (Figure 1). Étant donnée la pauvreté des informations concernant la toxicité, les directives sur le contrôle doivent être envisagées comme étant intérimaires, et certaines autorités pensent qu'il devrait s'agir de précautions – c'est-à-dire, autant que possible, de la réduction de l'exposition (HSE2004).

Résumé des faits probants concernant les dangers et les contrôles. La base de faits probants relatifs aux dangers et aux contrôles de la nanotechnologie a été étudiée dans diverses publications (Hett 2004 ; Maynard et Kuempel 2005 ; National Academy of Engineering 2004 ; NIOSH, 2006 ; Royal Society et Royal Academy of Engineering

2004 ; SCENIHR 2005) et elle est résumée dans le **Tableau 2** en quatre catégories de connaissances décrites en termes de dangers, de contrôles et de prise de conscience. Ces catégories sont susceptibles de mutation et sont en rapport avec l'état des connaissances à un moment donné. La catégorie 1 (« ce que nous avons conscience de savoir ») indique que nous avons une certaine connaissance des dangers pour la santé posés par certains types de nanoparticules (ex. : les particules extra fines) et de gaz et que nous savons comment contrôler. Cette catégorie s'applique à la génération actuelle de nanoparticules synthétisées et constitue la base de la plupart des directives courantes. Les connaissances de la catégorie 2 (« ce que nous avons conscience de ne pas savoir ») constituent la base de la plupart des recherches entreprises ou envisagées actuellement. En général, nous n'avons pas grande connaissance des dangers posés par les nouvelles particules fabriquées ou en prévision, et nous ne savons pas si des précautions suffisantes ont été prises. L'une des questions majeures n'est pas seulement de savoir comment contrôler l'exposition, mais encore, quels doivent être l'étendue et le coût appropriés des contrôles. Les connaissances de la catégorie 3 (« ce que nous n'avons pas conscience de savoir ») représentent la sous-utilisation des connaissances établies. C'est un fait que les hommes de science ont eu une vaste expérience des dangers et du contrôle de l'exposition dans les domaines des rayonnements ionisés, des agents biologiques, des produits pharmaceutiques, des poussières de céréales et minérales, et de la pollution de l'air. Cette expérience pourrait être amenée à servir plus directement au contrôle des dangers des nanomatériaux sur les lieux de travail. En outre, cette catégorie pourrait inclure les renseignements exclusifs et confidentiels relatifs aux nanoparticules, qui ne sont pas disponibles pour l'évaluation des risques. Les connaissances de la catégorie 4 (« ce que nous n'avons pas conscience de ne pas savoir ») représentent un domaine d'exploration philosophique perpétuel (Caws 1998). Cette catégorie comprend la gamme de scénarios sur la puissance des dangers et l'étendue des risques. Est-ce que de nouveaux scénarios présenteront de nouveaux types d'exposition et de risques ? La documentation de vulgarisation sur la nanotechnologie est pleine de caractérisations pour d'éventuels scénarios futurs, mais aucune prévision n'a été avancée concernant les dangers et les risques sur les lieux de travail (Drexler 1986; Regis 1995). Les connaissances de la catégorie 4 comprennent également le manque de prise de conscience des facteurs qui influencent une question. Il peut être remédié à ce manque de prise de conscience par la mise en cause d'une grande variété de disciplines et de communautés d'intérêts afin

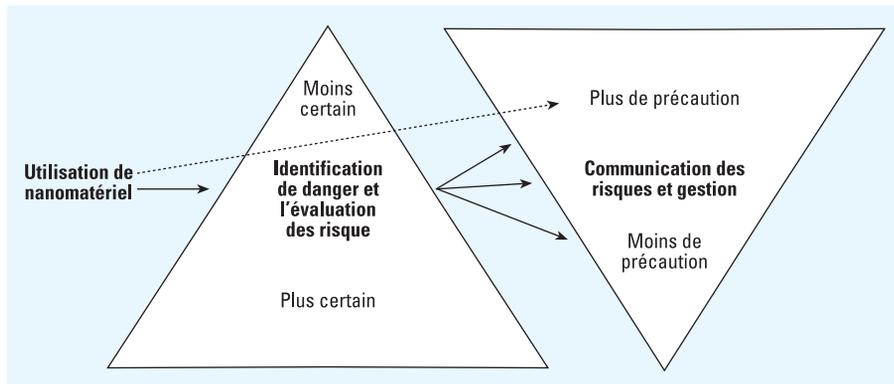


Figure 1. Prise de décision pour la gestion des risques mettant en jeu des nanoparticules sur les lieux de travail : quel est le niveau adéquat des contrôles ?

Tableau 2. Résumé de l'état des connaissances relatives aux dangers et aux contrôles des nanoparticules.

Prise de conscience des connaissances	Contenu des connaissances (dangers et contrôles)
1. Ce que nous avons conscience de savoir	Effets sur la santé des particules ultrafines, de la pollution de l'air et des fibres Comment contrôler les particules ultrafines sur les lieux de travail Importance de la dimension, de la superficie et des caractéristiques surfaciques Effets graves de certaines nanoparticules sur la santé des animaux Translocation de certains nanomatériaux le long du nerf olfactif chez les animaux
2. Ce que nous avons conscience de ne pas savoir	Techniques de mesure et de caractérisation Dangers des nouvelles particules synthétisées Portée de la translocation dans le corps Interaction avec des agents contaminants sur les lieux de travail Importance de l'exposition dermique Effets sur la santé des travailleurs Risques pour les travailleurs Efficacité des contrôles Recommandations de dépistage clinique et de surveillance biologique Risque pour les familles des travailleurs
3. Ce que nous n'avons pas conscience de savoir	Large expérience disponible pour le contrôle des agents et des substances dangereuses (rayonnements, agents biologiques et pharmaceutiques) pouvant s'appliquer aux nanoparticules Renseignements exclusifs et confidentiels sur les nanoparticules Leçons apprises de « nouvelles » technologies antérieures
4. Ce que nous n'avons pas conscience de ne pas savoir	Nouveaux dangers non prévus Nouveaux contrôles non prévus Présomptions incorrectes concernant les dangers et les contrôles

Adapté de Drew (1999) et Schulte et al. (2004).

de caractériser une question (HSE 2004). Les connaissances de la catégorie 4 comprennent aussi les croyances que nous observons, mais qui peuvent s'avérer être erronées. De telles croyances pourraient conduire à la prise de mesures protectrices ou à l'omission de la prise de telles mesures sur la base d'hypothèses mal fondées. Éventuellement, les connaissances de la catégorie 4 peuvent être transformées en connaissances de la catégorie 2, puis de la catégorie 1.

Quels que soient les types de connaissances envisagés, l'exigence ultime de l'éthique consiste à décrire avec exactitude l'état des connaissances relatives aux dangers ou aux risques et non pas à les sous-estimer ou à les surestimer. Cependant, étant donné la nature de la nanotechnologie, qui est en cours de développement, les connaissances des dangers éventuels vont changer au cours du temps et exigeront de nouvelles évaluations et probablement, une modification des directives. En l'absence de données adéquates d'évaluation des dangers et des risques, la question critique qui se pose est de savoir quel est le niveau des précautions à prendre.

Questions éthiques

Identification et communication des dangers et des risques. L'étape « d'identification des dangers » de l'analyse des risques est la base des prises de décision dans la gestion des risques. Le résultat de cette étape fait souvent l'objet de nombreux débats, car le processus du raisonnement est principalement qualitatif et les résultats déclenchent d'autres étapes d'analyse et de décisions concernant l'action préventive (Crawford-Brown and Brown 1997). L'interprétation des informations scientifiques relatives aux dangers des nanomatériaux se trouve à la base de la communication des dangers et des risques qui se présentent pour les travailleurs. L'interprétation et la communication des informations sur les dangers et les risques font partie intégrante de la gestion des risques par les employeurs. Ceux-ci centreront leur pouvoir de prise de décision sur la décision du choix des contrôles préventifs à mettre en jeu pour garantir un lieu de travail sécurisé et sain.

Les employeurs et les travailleurs font confiance aux hommes de science et aux autorités compétentes pour aider à interpréter les informations sur les dangers et les risques, ainsi que pour les placer dans leur contexte. Cette attente peut exercer une pression sur les chercheurs et les conduire à dépasser la simple conduite de la recherche. L'interface entre la science et la morale est extrêmement complexe, mais on considère généralement que les chercheurs ont des obligations déontologiques envers la société au sens large (Pimple 2002 ; Schrader-Frechette 1994 ; Weil 2002). Toutefois, aucun consensus n'a été établi sur

la nature de ces obligations déontologiques au-delà de la satisfaction des responsabilités professionnelles internes à la recherche scientifique. La mise en place d'un cadre clair et cohérent pour aborder les responsabilités déontologiques des chercheurs en nanotechnologie constitue une tâche difficile. Cette approche exige, pour le moins, que les chercheurs utilisent des qualificatifs adéquats dans les articles publiés et qu'ils fassent preuve de prudence lors de la généralisation de leurs résultats. Au sens plus large, cela signifie qu'ils ne doivent pas se refuser à considérer les implications de leurs travaux, même si tous les détails scientifiques ne sont pas encore connus.

Les décideurs peuvent disposer d'informations scientifiques inadéquates pour décider quelles mesures de précaution sont à prendre (Cairns 2003). Pour déterminer si une décision est conforme au principe de non-malfaisance, les décideurs doivent déterminer les dommages qui surviendraient si les nanoparticules étaient aussi toxiques que le suggèrent les informations préliminaires relatives aux dangers. Les données sur la pollution de l'air et les particules industrielles ultrafines indiquent qu'une masse donnée de nanoparticules présenterait une réaction biologique plus forte et pourrait être, par conséquent, plus toxique que la même masse de particules plus grandes (Seaton 2006). Il s'ensuit donc que le niveau de contrôle pourrait devoir être plus strict pour les poussières plus petites à la nanoéchelle que pour celles dont le diamètre est > 100 nm. Ultimement, le niveau plus strict des contrôles pourrait aboutir à des risques égaux ou plus faibles que les risques présentés par les particules plus grandes. Les autorités compétentes et les employeurs sont responsables de communiquer aux travailleurs les risques auxquels ils doivent faire face après la mise en œuvre des contrôles. Le défaut de procéder ainsi fait obstacle à l'exercice de leur autonomie par les travailleurs. Cette question peut être compliquée par le fait que l'employeur possède le droit exclusif de protéger la confidentialité des informations sur les « nanoproducts » et les contrôles sur les lieux de travail.

L'approche des questions éthiques par « l'analyse des principes » cible les principes tels que la non-malfaisance et l'autonomie, mais manque d'évaluer le contexte social et organisationnel de la sécurité et de la santé dans les milieux professionnels, ainsi que le rôle des praticiens par rapport à la structure sociétale (Gert et al. 1997 ; Samuels 2003). En ce qui concerne la nanotechnologie, les pressions contextuelles exercées sur les praticiens et les autorités proviennent des besoins et des souhaits de croissance et de développement de la nanotechnologie exprimés par les entreprises concernées. La mention de problèmes possibles pour la santé peut paraître alarmiste,

sans fondement et nuisible à la croissance de ce domaine d'activité. Néanmoins, la position contraire entraîne l'imposition aux praticiens d'exigences en conflit les unes avec les autres, notamment l'exigence d'être un agent de l'entreprise et un professionnel autonome qui constitue un problème social et structural plutôt qu'un problème d'éthique individuel (Draper 2003 ; Samuels 2003). Une solution possible serait d'envisager que les déclarations concernant la santé soient faites indépendamment des mesures promotionnelles en faveur de la nanotechnologie.

Acceptation des risques par les travailleurs. L'acceptation des risques est un concept relatif, comportant un jugement sur la certitude et la gravité des risques, l'étendue des effets sur la santé, la nature volontaire des risques, les risques et les avantages de toute solution alternative ainsi que la rémunération en contrepartie des risques acceptés (Fischhoff 1994). L'affirmation selon laquelle les travailleurs ont le libre choix de décider quel travail et quelles conditions de travail accepter est une fausse prémisse. Bien que certaines composantes de l'autodétermination soient présentes, les conditions économiques et sociales exercent la plus grande influence sur le choix de l'emploi des travailleurs, le niveau des risques tolérés et la capacité de participer à la gestion des risques. La participation des travailleurs à la gestion des risques n'est pas un concept statique. Au contraire, cette participation a augmenté au cours des 35 dernières années avec la mise en œuvre de méthodes de travail en équipe, de systèmes de gestion, de la mise en jeu de la responsabilité de l'entreprise et du droit à l'information et d'intervention (Gallagher 1997 ; Jensen 2002 ; Lynn 1997 ; Shearn 2005). Néanmoins, en général, les travailleurs ne peuvent pas universellement refuser les tâches qu'ils considèrent dangereuses et garder malgré tout leur emploi. La conformité au principe d'autonomie dépend de la mesure dans laquelle les travailleurs peuvent contribuer à la gestion des risques sur leur lieu de travail et du degré des risques qu'ils encourrent après que les contrôles aient été exercés.

La justice est également liée au pouvoir de prise de décision du travailleur. La question en jeu est l'étendue de l'exposition des travailleurs à des risques plus élevés que ceux supportés par le public en général – ou, en d'autres termes, s'il est approprié d'accorder des contreparties incitatrices, telles que des salaires ou des rémunérations pour un travail dangereux, pour la prise de risques supplémentaires posés par l'exposition aux nanoparticules (Schrader-Frechette 2002). Cette question peut être moins significative si le contrôle des nanoparticules réduit le niveau de risque des travailleurs au niveau supporté par le public en général, dans la mesure où

il est concevable que ces deux niveaux soient connus. Il est clair que la société accepte que certains emplois soient plus risqués que d'autres. Toutefois, dans de nombreux pays, le but de l'entreprise consiste à assurer à tous les travailleurs des lieux de travail sécurisés et sains.

Sélection et mise en œuvre des contrôles.

La question d'éthique critique liée au contrôle des nanoparticules consiste à savoir si des contrôles suffisants sont mis en œuvre pour éviter les préjudices corporels et les maladies. Dans la négative, l'exposition des travailleurs peut avoir pour résultat un risque accru de dommages ou des dommages avérés. Le fait scientifique au cœur du problème est que les risques présentés par les nanomatériaux ne sont pas bien établis. Cependant, les informations préliminaires suggèrent qu'un niveau d'inquiétude au moins égal à celui que l'on accorde aux particules industrielles fines et ultrafines devrait être donné aux nanomatériaux manufacturés, et qu'un niveau de protection au moins équivalent devrait être institué pour ces nanomatériaux (Hett 2004 ; Royal Society and Royal Academy of Engineering 2004 ; Seaton 2006). Tout risque présenté par l'exposition aux particules ultrafines est fonction de leur toxicité éventuelle et de l'étendue de l'exposition. En se basant sur un risque prouvé de toxicité limitée et sur le niveau accru des préoccupations, la meilleure approche pourrait consister à traiter les nanoparticules comme si elles représentaient des dangers professionnels éventuels et à employer une approche prudente pour la protection de la santé, basée sur les risques, afin de mettre au point des mesures préventives compatibles avec les bonnes pratiques professionnelles de sécurité et de santé dans les milieux de travail (Royal Society and Royal Academy of Engineering 2004).

Ces mesures préventives intérimaires pourraient comprendre des lignes directrices applicables aux évaluations de l'exposition sur les lieux de travail, à la mise en œuvre de contrôles de fabrication, à des pratiques de travail spécifiques, ainsi qu'à la mise au point, à titre d'éléments centraux, de limites d'exposition transitoires applicables à chaque procédé ou à l'industrie. Si la cible du contrôle de l'exposition est la dimension respirable des particules qui se trouvent dans l'atmosphère, cette méthode peut être utile et peut refléter le jugement professionnel de praticiens expérimentés. Si l'absorption par la peau est également une voie d'exposition probable, des lignes directrices devraient être mises au point pour la prévention de l'exposition de la peau. Malheureusement, les données sont insuffisantes pour entreprendre une évaluation solide basée sur les risques destinée à éclairer ces décisions.

L'évidence suggère qu'au moins certaines nanoparticules synthétisées seront plus toxiques par unité de masse que de plus grandes particules des mêmes produits chimiques (Royal Society and Royal Academy of Engineering 2004). Cependant, certains faits prouvés indiquent qu'avec l'emploi des contrôles existants pour les particules fines ou ultrafines, les travailleurs ne seront pas exposés à des risques anormalement élevés de maladie pulmonaire. Par exemple, des estimations établies à partir d'études sur les animaux indiquent que les travailleurs exposés à des particules ultrafines de dioxyde de titane au taux de 0,1 mg/m pendant une longévité professionnelle de 45 ans sont exposés à un risque plus important de contracter un cancer du poumon < 1/1 000 et pourraient en fait être à risque pratiquement nul (Kuempel et al. 2004). La base de ces résultats est le danger posé par la superficie croissante des particules pour une masse donnée de particules de petite dimension, dérivant d'études sur des animaux et extrapolé pour les humains. On ne sait pas dans quelle mesure cette analyse peut s'appliquer à d'autres nanoparticules et varier en fonction de la morphologie, de l'activité surfacique et de la persistance biologique. En outre, les risques précis de l'exposition à ces particules ultrafines ne peuvent être déterminés que si l'on dispose de données adéquates provenant d'études sur les animaux ou les humains. De surcroît, si les particules peuvent atteindre le système nerveux central ou le système circulatoire par translocation, il sera nécessaire de faire des estimations plus approfondies avant de tirer des conclusions (Oberdörster et al. 2005).

En bref, compte tenu de l'insuffisance des données probantes sur les dangers posés par la génération actuelle de nanoparticules, on doit s'attendre à ce que les risques (quels qu'ils soient) soient réduits lorsque les contrôles recommandés pour les particules industrielles ultrafines connues (telles que le dioxyde de titane) sont utilisés. Cette conclusion est justifiée par a) une évaluation généralisée des risques réalisée en se basant sur la superficie de particules faiblement solubles, de faible toxicité, et b) le fait que ces particules sont conformes aux lois traditionnelles de la physique et de l'aérodynamique lorsqu'elles se trouvent dans l'atmosphère. Toutefois, les évaluations futures des risques pourraient présenter des résultats différents en fonction de la persistance biologique, de la structure, de l'activité surfacique de nouvelles particules et d'informations plus approfondies sur la translocation à travers la barrière des cellules endothéliales. Si ces sujets deviennent la cible de la communication des risques et des tentatives de gestion des risques, il paraîtrait qu'il y ait conformité générale aux principes déontologiques de bienfaisance et

de non-malfaisance. Simultanément, aucun fait probant solide n'indique que les personnes travaillant dans ces environnements ne soient pas exposées à des risques excessifs. L'hypothèse d'un risque minime repose uniquement sur des évaluations qualitatives des risques et l'utilité prouvée des contrôles pour certains types de particules.

Dans l'ensemble, la base des connaissances relative aux nanomatériaux n'est pas statique, mais au contraire, évolue au fur et à mesure que les chercheurs mettent au point de nouveaux matériaux et entreprennent des recherches sur la toxicologie et les autres effets sur la santé. Par conséquent, l'évaluation en cours sur les risques pour la santé est nécessaire et, pour être conforme aux principes de déontologie présentés dans cet article, elle doit être concomitante à la communication et au développement de plans de gestion.

Mise en place de programmes de dépistage clinique. Le dépistage clinique est l'application de tests à des personnes asymptomatiques en vue de détecter celles qui pourraient être atteintes par les premiers stades d'une maladie ou qui pourraient être à risque de contracter la maladie. Le dépistage clinique sur les lieux de travail diffère du dépistage clinique dans la population générale en raison de la nature spécifique des conditions de travail et de la responsabilité des employeurs (Halperin et al. 1986 ; Harber et al. 2003). De nombreuses questions éthiques ont été identifiées en ce qui concerne le dépistage clinique des travailleurs, ainsi que l'usage et les conséquences des résultats (Ashford et al. 1990 ; Schulte 1986). Ces questions mettent en cause les raisons du dépistage, la nature volontaire du dépistage, les mesures qui seront prises pour les travailleurs ayant des tests positifs et les personnes qui auront accès aux données des tests.

Le dépistage clinique n'est généralement pas indispensable lorsque la toxicité d'un matériau et les risques pour les travailleurs sont inconnus – comme ceci est le cas avec la plupart des nanomatériaux. De surcroît, pour les maladies telles que le cancer du poumon (qui est un aboutissement possible de l'exposition à certaines nanoparticules), aucune base de faits probants solide n'existe pour un dépistage de routine ; et le dépistage du cancer du poumon chez la population normale n'est en général pas recommandé [National Cancer Institute (NCI) 2006]. Non seulement le dépistage échoue pour réduire la mortalité due au cancer du poumon, mais il pourrait encore aboutir à des résultats de test faux positifs et à des procédures ou des traitements invasifs non nécessaires (NCI 2006). Le dépistage clinique des travailleurs peut être indiqué pour les effets respiratoires non cancéreux dans certaines opérations nanotechnologiques où des risques résiduels significatifs peuvent se présenter après la mise en

œuvre des contrôles. Ces dépistages devraient faire partie d'un programme élargi de gestion des risques tenant compte non seulement des dangers respiratoires, mais aussi des risques cardiovasculaires et neurologiques, ainsi que des risques pour divers autres systèmes et organes cibles éventuels (Oberdörster et al. 2005 ; Shvedova et al. 2005 ; Tran et al. 2005). S'il est prouvé que divers nanomatériaux ont des effets toxiques et si des tests adéquats (validés) existent pour la détection précoce de ces effets chez les travailleurs exposés, le dépistage clinique pourrait être indiqué. Cependant, le dépistage clinique est envisagé historiquement comme un moyen préventif secondaire dans la hiérarchie des contrôles (Ashford et al. 1990).

Les questions éthiques soulevées par le dépistage clinique des travailleurs ont trait aux situations suivantes : le dépistage est-il volontaire, qui aura accès aux résultats et quel sera le but de cet accès aux résultats. Le dépistage exige généralement une confirmation du diagnostic ; et pour les cas positifs, le dépistage exige un traitement sans délai. Qui est financièrement responsable de ces procédures ? Des questions éthiques peuvent également se poser lors de l'utilisation des résultats du dépistage, en singularisant ou en stigmatisant les travailleurs, ou en leur retirant leurs fonctions. Les résultats du dépistage peuvent aussi créer des fardeaux psychologiques. La résolution de ces problèmes d'éthique dépendra en partie du niveau d'information du travailleur relativement à la manière dont seront utilisés les résultats.

Garantie d'investissements adéquats dans la recherche sur la toxicologie et le contrôle. On ne peut pas traiter adéquatement les questions éthiques relatives à la nanotechnologie sans une connaissance suffisante des risques mis en jeu. Comme les informations disponibles sur la sécurité d'un nombre sans cesse croissant de nanomatériaux sont limitées, des travaux de recherche continus sont nécessaires pour assurer la conformité aux principes d'autonomie, de bienfaisance et de non-malfaisance. En outre, la recherche est nécessaire pour déterminer les limites d'exposition et l'efficacité des contrôles. Sur le plan international, cette recherche est en cours.

Toutefois, la question du niveau de financement de cette recherche pose des questions éthiques parce que la plupart des directives applicables aux contrôles actuels ont pour objectif la prise de précautions et elles ne sont pas fondées sur des évaluations solides et quantitatives des risques. L'approfondissement de la recherche est le seul moyen de combler ce manque d'informations adéquates.

Certains commentateurs ont fait appel à un ralentissement de la recherche et du développement sur les nanoparticules, tandis que d'autres ont identifié un besoin de recherche

accélérée sur les effets pour la santé et l'analyse déontologique [Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC Group) 2003, 2004 ; Mnyusiwalla et al. 2003]. Les besoins de recherche sur les questions de santé ont été identifiés et comprennent les sujets suivants : exposition et dose, toxicité, métrologie, épidémiologie, technologie du contrôle, sécurité, éducation, recommandations et applications à court terme (NIOSH 2006).

Les chercheurs pourraient aller plus loin pour faciliter les discussions sur les questions éthiques en évaluant le budget mondial de la recherche et du développement de la nanotechnologie et en déterminant les montants réels dédiés à la recherche sur les questions de sécurité et de santé dans les milieux professionnels ainsi qu'à la recherche dans le domaine de l'éthique. Mondialement, cette information n'est pas bien documentée. On peut toutefois prendre en considération les données existantes aux États-Unis. Pour la première fois depuis sa création, le financement du NNI pour 2005 a été réparti par catégorie de composante du programme. Le financement de la catégorie de composante Dimensions sociétales incluait 39 millions de dollars US pour l'environnement, la santé et la sécurité, et 43 millions de dollars US pour l'éducation du public dans le domaine des conséquences largement comprises de la nanotechnologie pour la société (notamment les aspects économiques, les lieux de travail, l'éducation, l'éthique et les aspects juridiques). Ce financement provenait de 11 agences dont le budget nanotechnologie combiné s'élevait à environ 1 054 milliards de dollars US. Ce niveau de financement (7,8 % du total) a été critiqué comme étant insuffisant pour la composante Dimensions sociétale et la sous-catégorie consacrée à la santé et à la sécurité dans les milieux professionnels (Bartis et Landree 2006 ; Maynard 2006 ; Service 2005). Néanmoins, il existe au niveau international une action concertée pour étudier les aspects santé et sécurité des nanomatériaux (NSTC 2006 ; Thomas et al. 2006).

Promotion du respect des personnes. Sous-jacente aux débats sur la nanotechnologie, on découvre l'existence de la question de la tolérance de nuisances pouvant affecter certaines personnes dans le contexte des avantages attendus pour la société. Cette façon de penser intègre le point de vue utilitariste selon lequel on peut justifier les dommages infligés à une personne par les avantages plus importants obtenus par quelqu'un d'autre (Harris 2003). Ce point de vue contraste avec le principe déontologique du respect des personnes, qui met l'accent sur les droits individuels et qui est associé à la règle d'or (« Traite ton prochain comme tu souhaiterais être traité toi-même ») (Gewirth 1978, 1986). Sur les lieux de travail, ce principe se traduit par la

reconnaissance de ce que chaque travailleur ait droit à un environnement de travail sécurisé et sain. Ce droit impose des responsabilités correspondantes aux employeurs et aux gouvernements, qui doivent protéger le droit des travailleurs à un lieu de travail sécurisé et sain (Gewirth 1986). L'objection faite à cette interprétation avance que les droits des employeurs et, par conséquent, les droits de la société, à jouir de leurs biens et donc des avantages de la nanotechnologie peuvent être (ou peuvent paraître être) en conflit avec les droits des travailleurs. Quand deux droits entrent en conflit l'un avec l'autre, il faut trouver un moyen raisonnable de déterminer leur ordre de priorité. Gewirth (1986) a identifié comme critère essentiel à l'établissement de ces priorités le degré de la nécessité d'entrer en action. Par exemple, lorsque le droit de propriété de l'employeur peut se trouver en conflit avec le droit des travailleurs à la sécurité et à la santé, la baisse de l'état de santé ou la menace de la sécurité diminue la capacité d'action des personnes en cause et s'avère être une plus grande perte que la réduction des biens ou de la richesse d'une autre personne et de la liberté de les contrôler. Le résultat pratique est le suivant : En l'absence d'information adéquate sur les dangers, les risques et les contrôles de la nanotechnologie, les employeurs devraient être incités à utiliser plus de mesures de contrôle plutôt que moins (Hett 2004). La conduite d'évaluations des dangers spécifiques au lieu de travail et l'usage de contrôles appropriés paraissent démontrer la conformité au principe du respect des personnes et aux principes d'autonomie, de bienfaisance et de non-malfaisance. Cependant, l'étendue des mesures de contrôle nécessaires pourrait être la raison clé du conflit. Pour la plus grande part, le contrôle de la génération actuelle de la plupart des nanoparticules de synthèse fait partie des capacités des technologies existantes. La question revient à évaluer le montant de l'investissement à réaliser pour appliquer ces technologies sur un lieu de travail donné.

Stratégies à l'appui des prises de décision conformes à l'éthique

Donner une importance spéciale aux petites entreprises. Les problèmes de santé et de sécurité sur les lieux de travail dans les petites entreprises ont fait l'objet de préoccupations majeures, en particulier au cours des dix dernières années, étant donné que la plupart des lieux de travail tombent dans la catégorie des petites entreprises (c.-à-d., des entreprises employant moins de 250, 100 ou 20 travailleurs, selon la définition). Cette observation sera probablement applicable aux lieux de travail mettant en jeu la nanotechnologie, mais cela n'est pas bien documenté (Aitken et al. 2004 ; Roco et Bainbridge 2003). La

fréquence des accidents du travail et des maladies professionnelles dans les petites entreprises peut dépasser la moyenne pour l'industrie en général dans tout l'éventail des entreprises d'un secteur, mais la fréquence peut ne pas être évidente au sein d'une entreprise particulière (NIOSH 1999). Les petites entreprises sont perçues, en général, comme disposant de peu de temps et de ressources consacrés à la question des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les petites entreprises sont la force qui entraîne la plupart des économies, notamment les sous-catégories économiques liées à la nanotechnologie (Roco et Bainbridge 2003). Les consultants indépendants, les syndicats et associations professionnelles, les compagnies d'assurance, les fournisseurs de produits et les agences administratives constituent les sources d'information majeures concernant la santé et la sécurité sur les lieux de travail dans les petites entreprises. Les informations concernant la santé et la sécurité sur les lieux de travail peuvent également être transmises en aval aux utilisateurs de nanoparticules par les fournisseurs en amont. En fait, en ce qui concerne les dangers documentés, les fournisseurs ont l'obligation déontologique ou juridique de les communiquer aux clients en aval. Il existe un besoin de lignes directrices applicables à la santé et à la sécurité sur les lieux de travail dans les petites entreprises relativement à l'information sur les dangers et les contrôles de la nanotechnologie.

Adoption d'une perspective mondiale. La croissance de la nanotechnologie est un phénomène mondial, qui exige l'étude des dangers et des risques au niveau mondial, en particulier sur les lieux de travail. Le monde a besoin de normes valides au niveau international pour les matériaux concernés par la nanotechnologie ainsi que d'une nomenclature uniforme (American Society for Testing and Materials 2005 ; Hett 2004). Sans nomenclature uniforme, les enquêteurs, investigateurs, assureurs, autorités réglementaires, administrations, sociétés et travailleurs pourraient éprouver des difficultés à communiquer et à prendre des mesures concertées.

Le flux de matériaux dans l'économie mondiale traverse de nombreuses frontières, notamment celles des nations en cours de développement (Salamanca-Buentello et al. 2005). C'est ainsi que pour garantir la santé et la sécurité des travailleurs, les décideurs (qu'il s'agisse d'employeurs ou d'autorités administratives) doivent connaître et comprendre les matériaux utilisés dans les divers procédés et opérations. Cette question est compliquée, car différentes définitions et descriptions peuvent être utilisées dans les documents scientifiques et les documents réglementaires. Pour développer la nanotechnologie avec le minimum de risques, il faut identifier les lacunes dans

les connaissances et résoudre les questions que cela pose dans le cadre d'une coopération internationale. Il existe également un besoin de cadre d'évaluation transparent des risques susceptible de recueillir un niveau d'acceptation élevé (SCENIHR 2005).

Les méthodes d'approche mondiales pour le partage des informations concernant la santé et la sécurité sur les lieux de travail exigent des occasions et des moyens accrus d'accès à l'information. Le « droit » de connaître les risques – ou au sens plus large, le droit à l'information – n'est pas reconnu de la même façon dans le monde entier (Pantry 2002). L'Organisation mondiale de la santé (OMS) assure la promotion pour tous du droit à la santé au travail. L'information est l'un des moyens permettant d'exercer ce droit. Malgré l'adhésion élargie de nombreux pays à l'OMS, le véritable accès à l'information et à sa distribution au sein des pays constitue toujours un problème.

La communication des risques (notamment les fiches signalétiques sur la sécurité des substances) devrait comprendre un certain niveau d'uniformité dans le monde entier. La collaboration internationale garantira que les procédés dangereux ne seront pas relégués dans des pays où la main-d'œuvre est bon marché ou dans ceux où les contrôles de protection de l'environnement sont laxistes (Singer et al. 2005, 2006). Il se pose une question critique ayant des conséquences au plan tant national qu'international, à savoir si les pays traiteront les nanomatériaux fabriqués avec une substance donnée différemment des matériaux fabriqués avec de plus grandes particules de la même substance. Les caractéristiques des nanoparticules peuvent différer de celles de particules plus grandes ayant la même composition. Par exemple, la plupart des matériaux fabriqués à partir de carbone paraissent ne poser, en général, que des risques minimes pour la santé ; cependant, les nanotubes fabriqués en carbone pourraient poser un risque plus élevé pour la santé et n'être toutefois réglementés qu'au niveau de protection le plus bas (Shvedova et al. 2005). La question est de savoir s'il faut recommander la même stratégie de communication et de gestion des risques dans les deux cas. En se basant sur l'exemple des nanotubes en carbone, il est probable que de nouvelles normes et de nouveaux supports de communication des risques seront requis pour un certain nombre de nanoparticules au moins.

Conclusions

Les questions éthiques concernant la nanotechnologie sur les lieux de travail sont soulevées en raison de l'état des connaissances relatives aux dangers des nanomatériaux et des risques qu'ils peuvent présenter pour les travailleurs. Le manque de clarté régnant

sur ces questions nécessite une évaluation à titre transitoire des dangers et des risques pouvant exister dans certaines circonstances. Les travailleurs pourront exercer leur droit à l'autonomie seulement si les processus conduisant à l'identification des dangers et à l'évaluation des risques sont transparents et compréhensibles. Les employeurs se conformeront aux principes d'autonomie, de bienfaisance, de non-malfaisance, de justice, de respect de la vie privée et de respect des personnes dans la mesure où ils a) décrivent les dangers et les risques avec exactitude, b) prennent une attitude précautionneuse à l'égard des dangers, c) s'engagent dans le dialogue et la communication avec les travailleurs, et d) prennent les mesures nécessaires pour contrôler les risques qui, ce faisant, paraîtront raisonnables et acceptables pour les travailleurs.

REFERENCES

- ACGIH. 2001. *Industrial Ventilation: a Manual of Recommended Practice*. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Aitken RJ, Creely KS, Tran CL. 2004. Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review. Health Safety Executive, Research Report 274. London: HSE Books.
- Ashford NA, Spadafor CJ, Hattis DB, Caldwell CC. 1990. *Monitoring the Worker for Exposure and Disease: Scientific Legal and Ethical Considerations in the Use of Biomarkers*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press.
- American Society for Testing and Materials. 2005. *New Standard Terminology for Nanotechnology*. WK8051. Available: <http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK8051.htm?L+mystore+rdik5786+1158038968> [accessed 11 September 2006].
- Bartis JT, Landree E. 2006. *Nanomaterials in the Workplace: Policy and Planning Workshop on Occupational Safety and Health*. Arlington, VA: RAND Corporation.
- Beauchamp TL, Childress JI. 1994. *Principles of Biomedical Ethics*. 4th ed. New York: Oxford University Press.
- Berube DM. 2004. The rhetoric of nanotechnology. In: *Discovering the Nanoscale* (Baird D, Nordman A, Schummer J, eds). Amsterdam: IOS Press, 173–192.
- Brown RC. 1993. *Air Filtration*. New York: Pergamon Press.
- Burton J. 1997. General methods for the control of airborne hazards. In: *The Occupational Environment—Its Evaluation and Control* (DiNardi SR, ed). Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association.
- Cairns J Jr. 2003. Integrating top-down/bottom-up sustainability strategies: an ethical challenge. *Ethics Sci Environ Politics* 1–6. Available: <http://www.int-res.com/articles/esep/2003/E26.pdf#search=%22cairns%20integrating%20top-down%202003%22> [accessed 11 September 2006].
- Caws P. 1998. Communication lag. *Sci Commun* 20:14–20.
- Crawford-Brown DJ, Brown KG. 1997. A framework for assessing the rationality of judgments in carcinogenicity hazard identification. *Risk* 8:307. Available: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol8/fall/Cr-Br+.htm> [accessed 11 September 2006].
- Davies CN. 1966. *Aerosol Science*. London: Academic Press.
- Donaldson K, Aitken R, Tran L, Stone V, Duffin R, Forrest G, et al. 2006. Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. *Toxicol Sci* 92:5–22.
- Donaldson K, Stone V, Tran CL, Kreyling W, Borm PJA. *Nanotoxicology*. 2004. *Occup Environ Med* 61: 727–728.
- Draper E. 2003. *The Company Doctor: Risk and Responsibility and Corporate Professionalism*. New York: Russell Sage Foundation.
- Drew S. 1999. Building knowledge management into strategy: making sense of a new perspective. *Long Range Planning* 32:130–136.
- Drexler KE. 1986. *Engines of Creation*. New York: Anchor Press/

- Doubleday.
- Elder A, Gelein R, Silva V, Feikert T, Opanashuk L, Carter J, et al. 2006. Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environ Health Perspect* 114:1172–1178.
- ETC Group. 2003. The Big Down: From Genomes to Atoms. Winnipeg, Ontario, CN:Action Group on Erosion, Technology and Concentration.
- ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration). 2004. Down on the Farm: The Impact of Nano-Scale Technologies on Food and Agriculture. http://www.etcgroup.org/upload/publication/80/01/etc_dotfarm2004.pdf [accessed 16 November 2006].
- Fischhoff B. 1994. Acceptable risk: a conceptual proposal. *Risk* 5:1. Available: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol5/winter/Fischhoff.htm> [accessed 11 September 2006].
- Friedlander SH. 1997. *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Behavior*. New York: John Wiley and Sons.
- Fuchs NA. 1964. *The Mechanics of Aerosols*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Gallagher C. 1997. Types of health and safety management systems. In: *Health and Safety Management Systems: An Analysis of System Types and Effectiveness*. Canberra, ACT: Office of the Australian Safety and Compensation Council.
- Gert B, Culver CM, Clouser, KD. 1997. *Bioethics: A Return to Fundamentals*. New York: Oxford University Press.
- Gewirth A. 1978. *Reason and Morality*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gewirth A. 1986. Human rights in the workplace. *Am J Ind Med* 9:31–40.
- Halperin WE, Ratcliffe J, Frazier TM, Wilson L, Becker SP, Schulte PA. 1986. Medical screening in the workplace: proposed principles. *J Occup Med* 28:547–552.
- Harber P, Conlon C, McCunney RJ. 2003. Occupational medical surveillance. In: *A Practical Approach to Occupational and Environmental Medicine* (McCunney RJ, ed). Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 582–599.
- Harris CE. 2003. Methodologies for case studies in engineering ethics. In: *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering*. Washington, DC: National Academy of Sciences, 79–93.
- Heinrich U, Fuhrst R, Rittinghauseen S, Creutzenberg O, Bellmann B, Koch W, et al. 1995. Chronic inhalation exposure of Wistar rats and 2 different strains of mice to diesel-engine exhaust, carbon black, and titanium dioxide. *Inhal Toxicol* 7:533–556.
- Hett A. 2004. *Nanotechnology: Small Matter, Many Unknowns*. Zurich: Swiss Reinsurance Company. Available: [http://www.swissre.com/INTERNET/pwfilpr.nsf/vwFilebyID-KEYLu/UJR-68AKZF/\\$FILE/Publi04_nano_en.pdf](http://www.swissre.com/INTERNET/pwfilpr.nsf/vwFilebyID-KEYLu/UJR-68AKZF/$FILE/Publi04_nano_en.pdf) [accessed 16 November 2006].
- Hinds WC. 1999. *Aerosol Technology*. New York: John Wiley & Sons.
- HSE. 2004. *Nanotechnology HSE Information Note*. Horizons Scanning Information Note no. HSIN1. London: Health and Safety Executive.
- Jensen PL. 2002. Assessing assessment: the Danish experience of worker participation in risk assessment. *Econ Ind Democracy* 23:201–207.
- Kantowitz A. 1995. The separation of facts and values. *Risk* 6:105. Available: <http://www.piercelaw.edu/Risk/vol6/spring/Kantowitz.htm> [accessed 12 September 2006].
- Kipen HM, Laskin DL. 2005. Smaller is not always better: nanotechnology yields nanotoxicology. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 289(5):L696–L697.
- Kuempel ED, Wheeler M, Smith R, Bailer J. 2004. A quantitative risk assessment in workers using rodent dose-response data of fine and ultrafine titanium dioxide. In: *Report of Presentations of Plenary and Workshop Sessions and Summary of Conclusions. Nanomaterials—A Risk to Health at Work? 12-14 October 2004*, Buxton, UK. Buxton, UK: Health and Safety Laboratory. Available: http://www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymrep_final.pdf [accessed 12 September 2006].
- Lam CW, James JT, McCluskey R, Hunter RL. 2004. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicol Sci* 77:126–134.
- Lam CW, James JT, McCluskey R, Arlli S, Hunter RL. 2006. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks. *Crit Rev Toxicol* 36:159–217.
- Lynn FM. 1997. *Public Participation in Risk Management Decisions: The Right to Define, the Right to Know, and the Right to Act*. *Risk* 1:95. Available: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol1/spring/lynn.htm> [accessed 11 September 2006].
- Mark D. 2004. *Nanomaterials—A Risk to Health at Work?* Buxton, UK: Health and Safety Laboratory, SK17 9 JN. Available: www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymrep_final.pdf [accessed 11 September 2006].
- Maynard AD. 2006. *Nanotechnology: A Research Strategy for Addressing Risk*. Washington, DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars.
- Maynard AD, Kuempel ED. 2005. Airborne nanostructured particles and occupational health. *J Nanoparticles Res* 7:587–614.
- Mnyusiwalla A, Daar AS, Singer PA. 2003. “Mind the Gap”: science and ethics in nanotechnology. *Nanotechnology* 14:R9–R13.
- Moor J, Weichert J. 2004. Nanoethics: assessing the nanoscale from an ethical point of view. In: *Discovering the Nanoscale* (Baird D, Nordmann A, Schummer J, eds). Amsterdam: IOS Press, 301–310.
- National Academy of Engineering. 2004. *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering: Papers from a Workshop, 14–15 October 2003*, Washington, DC. Washington, DC: National Academies Press. Available: <http://newton.nap.edu/books/030909271X/html> [accessed 16 November 2006].
- NCI (National Cancer Institute). 2006. *Lung Cancer (PDQ®): Screening*. Available: <http://www.cancer.gov/cancertopics/pdq/screening/lung/healthprofessional> [accessed 16 November 2006].
- Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. 2006. Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science* 311: 622–627.
- NIOSH. 1999. *Identifying High-Risk Small Business Industries: The Basis for Preventing Occupational Injury, Illness, and Fatality*. NIOSH (DHHS) Publ no. 99–107. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health.
- NIOSH. 2006. *Approaches to Safe Nanotechnology: An Information Exchange with NIOSH*. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health. Available: <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/safenan/> [accessed 11 September 2006].
- NNI (National Nanotechnology Initiative). 2004. *NNI Strategic Plan*. Available: www.nano.gov/html/about/strategicplan2004.html [accessed 12 September 2006].
- NSTC. 2006. *The National Nanotechnology Initiative. Environmental, Health and Safety Research for Engineered Nanoscale Materials*. Arlington, VA: National Nanotechnology Coordination Office, National Science and Technology Council.
- Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 113:823–837.
- OTA. April 1985. *Preventing Illness and Injury in the Workplace*. OTA-H-256. Washington, DC: U.S. Congress, Office of Technology Assessment.
- Pantry S. 2002. *The Unequal OSH (Occupational Safety and Health) World of Information*. Available: <http://www.sheila-pantry.com/oshworld/editorial/2002/200206.html> [accessed 16 November 2006].
- Peters A. 2005. Particulate matter and heart disease: evidence from epidemiological studies. *Toxicol Appl Pharmacol* 207:S477–S482.
- Pimple KD. 2002. Six domains of research ethics. A heuristic framework for the responsible conduct of research. *Sci Eng Ethics* 8:191–205.
- Radomski A, Jurasz P, Alonso-Escobano P, Drew M, Morandi M, Tadeusz M, et al. 2005. Nanoparticle-induced platelet aggregation and vascular thrombosis. *Br J Pharmacol* 146:882–893.
- Ratherman S. 1996. *Methods of control*. In: *Fundamentals of Industrial Hygiene* (Plog B, ed). Itasca, IL: National Safety Council.
- Regis E. 1995. *Nano: The Emerging Science of Nanotechnology: Remaking the World-Molecule by Molecule*. New York: Little Brown and Co.
- Roco MC, Bainbridge WS. 2003. *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Nanoscale Science, Engineering and Technology (NSET) Workshop Report, 3-5 December 2005, Arlington, VA. Arlington, VA: National Science Foundation.
- Royal Society and Royal Academy of Engineering. 2004. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. London: Royal Society and Royal Academy of Engineering.
- Salamanca-Buentello F, Persad DL, Court EB, Martin DK, Daar AS, Singer PA. 2005. *Nanotechnology and the developing world*. *PLoS Med* 2:e97.
- Samuels S. 2003. Occupational medicine and its moral discontents. *J Occup Environ Med* 45:1226–1233.
- SCENIHR. 2005. *Request for a Scientific Opinion on the Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Nanotechnologies*. SCENIHR/002/05. Brussels: European Commission, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks.
- Schrader-Frechette K. 1994. *Ethics of Scientific Research*. Lanham, MD: Rowan and Littlefield.
- Schrader-Frechette K. 2002. *Environmental Justice: Creating Equality, Reclaiming Democracy*. New York: Oxford University Press.
- Schulte PA. 1986. Problems in notification and screening of workers at high risk of disease. *J Occup Med* 28:951–957.
- Schulte PA, Lentz TJ, Anderson VP, Lamborg AD. 2004. Knowledge management in occupational hygiene: the United States example. *Ann Occup Hyg* 48:583–594.
- Seaton A. 2006. Nanotechnology and the occupational physician. *Occup Med (Lond)* 56(5):312–316.
- Service RF. 2005. Calls rise for more research on toxicology of nanomaterials. *Science* 310:1609.
- Shearn P. 2005. *Workforce Participation in Occupational Health and Safety in Non-Unionized Workplaces*. HSE Report no. HSL/2005/41. London: Health and Safety Executive.
- Shvedova AA, Kisin EK, Mercer R, Murray AR, Johnson VJ, Potapovich AI, et al. 2005. Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 289(5): L698–L708.
- Singer P. 2004. *Nanotechnology Ethics. Designing Nanostructures—A Tutorial*. New York: New York Academy of Sciences. Available: <http://www.nyas.org/ebriefreps/splash.asp?intbriefID=321> [accessed 16 November 2006].
- Singer PA, Daar AS, Salamanca-Buentello F, Court EB. 2006. *Nano-diplomacy*. Georgetown J Int Affairs Winter/Spring:129–137.
- Singer PA, Salamanca-Buentello F, Daar AS. 2005. *Harnessing nanotechnology to improve global equity*. *Iss Sci Technol Summer*: 57–64.
- Thomas K, Aguar P, Kawasaki H, Morris J, Nakanishi J, Savage N. 2006. *Research strategies for safety evaluations of nanomaterials. Part VIII: International efforts to develop risk-based safety evaluations for nanomaterials*. *Toxicol Sci* 92:23–32.
- Tran CL, Buchanan D, Cullen RT, Searl A, Jones AD, Donaldson K. 2000. Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhal Toxicol* 12:1113–1126.
- Tran CL, Donaldson K, Stones V, Fernandez T, Ford A, Christofi N, et al. 2005. *A Scoping Study to Identify Hazard Data Needs for Addressing the Risks Presented by Nanoparticles and Nanotubes*. Research Report. London: Institute of Occupational Medicine.
- U.S. EPA. 2004. *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Vol 1. 600/p-99/002aF. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Wardak A, Rejeski D. 2003. *Nanotechnology and Regulation: A Case Study Using the Toxic Substances Control Act (TSCA); A Discussion Paper*. Publication 2003–6. Washington, DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars, Foresight and Governance Project.
- Warheit DB, Laurence BR, Reed KL, Roach DH, Reynolds GAM, Webb TR. 2004. Comparative toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. *Toxicol Sci* 76:117–125.
- Weil V. 2002. Making sense of scientists’ responsibilities at the interface of science and society. *Sci Eng Ethics* 8:223–227.